



دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گیلان

نشریه پژوهش‌های علوم و فناوری چوب و جنگل

جلد بیست و چهارم، شماره چهارم، ۱۳۹۶

<http://jwfst.gau.ac.ir>

پالایش زیستی باگاس و مغز آن به روش پیرولیز سریع در راکتور بستر سیال

پیام قربان‌نژاد^۱، محمدرضا دهقانی فیروزآبادی^۲، علی قاسمیان^۳، پاول د ویلد^۴، هیرو جان هیرس^۴

^۱دانشجو دکتری گروه صنایع خمیر و کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۲دانشیار گروه صنایع خمیر و کاغذ، دانشکده مهندسی چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان،

^۳مدیر پروژه بیومس مرکز تحقیقات انرژی هلند، دکتری مهندسی شیمی از دانشگاه خرونینگن هلند،

^۴استاد و رئیس دپارتمان مهندسی شیمی، دانشگاه خرونینگن هلند

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۳

چکیده

سابقه و هدف: زیست‌توده تنها منبع تجدیدپذیر کربن جهت تبدیل به زیست‌سوخت و محصولات با ارزش افزوده زیاد است. فرآیندهای شیمیایی- حرارتی مانند پیرولیز سریع می‌توانند نقش مهمی برای تولید زیست‌سوخت، مواد شیمیایی زیستی و گازها با فناوری‌های زیست‌پالایش ایفا کنند. با توجه به اینکه، نیشکر به‌طور وسیع در جنوب کشور کشت می‌شود و مغز باگاس از فراوان‌ترین ضایعات زیست‌توده لیگنوسلولزی حاصل از فرآیند مغززدایی در صنایع خمیر و کاغذ و MDF در ایران است، هدف این تحقیق مقایسه امکان استفاده از باگاس و مغز آن جهت تولید زیست‌نفت در راکتور نیمه‌صنعتی بستر سیال و توسعه کاربردی پالایش زیستی جهت تولید زیست‌سوخت و مواد با ارزش افزوده زیاد است.

مواد و روش‌ها: این تحقیق جهت تولید زیست‌سوخت در راکتور نیمه‌صنعتی بستر سیال از باگاس (مغززدایی نشده) و مغز آن انجام گرفت. ترکیبات باگاس با آنالیز تقریبی و آنالیز نهایی اندازه‌گیری شد. با استفاده از آنالیزکننده عنصری، نوع و مقدار فلزات سنگین نیز تعیین گردید. ویژگی‌های تخریب حرارتی توسط آنالیز وزن‌سنجی حرارتی اندازه‌گیری شد. پیرولیز سریع در دمای ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت تغذیه ۹۰ گرم در دقیقه، اندازه ذرات ۰/۵ میلی‌متر درون پیرولیزکننده همراه گاز نیتروژن با سرعت ۲ لیتر بر دقیقه انجام شد.

یافته‌ها: آنالیز عنصری نشان داد که مغز باگاس حاوی مقدار قابل توجهی مواد استخراجی و غیرآلی (غالباً کلسیم، پتاسیم، و منیزیم) است. نتایج وزن‌سنجی حرارتی بیان کرد که بیشترین اتلاف وزنی باگاس و مغز آن در دمای بین ۲۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که با تجزیه حرارتی ترکیبات اصلی آن‌ها (سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) مرتبط است. تحت شرایط ذکر شده، بازده زیست‌نفت، ذغال زیستی و سینگاز برای باگاس و مغز آن به ترتیب ۵۳/۲ و ۳۵/۵ درصد، ۲۵ و ۳۷ درصد، و ۲۱ و ۲۷/۵ درصد وزنی به‌دست آمد. کربن ثابت زیست‌نفت حاصل از باگاس بیشتر از مغز آن بود که منجر به ارزش حرارتی بیشتر آن می‌شود؛ در صورتی که مغز باگاس ذغال زیستی بیشتری تولید می‌کند. ارزش حرارتی زیست‌نفت حاصل از باگاس حدود ۲۰/۶ مگاژول بر کیلوگرم به‌دست آمد که بیشتر از ارزش حرارتی

*مسئول مکاتبه: m_r_deghani@mail.ru

مغز باگاس و بسیاری از مواد لیگنوسلولزی گزارش شده در منابع است. اکسیژن کمتر موجود در باگاس، هزینه فرآیند تقویت زیست‌نفت جهت تبدیل به بیودیزل و دیگر مواد شیمیایی را کاهش می‌دهد. ترکیبات گازی پیرولیز سریع باگاس و مغز آن از گاز دی‌اکسید کربن، منواکسید کربن، متان، هیدروژن و سایر هیدروکربن‌ها مانند اتان، پروپان و اتیلن تشکیل شده است. گاز دی‌اکسید کربن، گاز غالب در بین گازهای دیگر است. باگاس مقدار دی‌اکسید کربن بیشتری نسبت به مغز باگاس در طی فرآیند پیرولیز سریع تولید می‌کند.

نتیجه‌گیری: مغز باگاس به دلیل داشتن لیگنین بیشتر موجب پایداری حرارتی زیادتر و در نتیجه تولید ذغال زیستی بیشتری نسبت به باگاس طی فرآیند پیرولیز سریع می‌شود. زیست‌نفت حاصل از پیرولیز سریع باگاس نه تنها امکان تولید انرژی تجدیدپذیر و تولید ماده شیمیایی مختلف را نشان داده است، بلکه گازهای حاصل از آن (سینگاز) به عنوان یک منبع مناسب تأمین انرژی در صنایع قابل استفاده است.

واژه‌های کلیدی: مغز باگاس، پالایش زیستی، زیست‌سوخت، پیرولیز سریع

مقدمه

زیست‌پالایش با در نظر گرفتن مفاهیم توسعه‌یافته به عنوان یک مفهوم جدید جهت تولید انرژی پاک و محصولات شیمیایی با ارزش از زیست‌توده است. فناپذیری سوخت‌های فسیلی، نیاز به منابع انرژی تجدیدپذیر، توسعه پایدار و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی فسیلی توجه به کاربرد زیست‌پالایش در صنایع را افزایش داده است. زیست‌پالایش به طور همزمان می‌تواند زیست‌سوخت و همچنین مواد شیمیایی با ارزش، حرارت و برق تولید کند. زیست‌پالایش به عنوان یک مسیر جذاب جهت دستیابی به اهداف توسعه پایدار و محافظت از محیط زیست دیده می‌شود. برخلاف پالایشگاه‌های نفت که نیاز به واحدهای صنعتی بزرگ و سرمایه زیاد دارد، زیست‌پالایش در اندازه‌های مختلف قابل انجام است (۲۰). زیست‌توده به عنوان منبع مهم و تجدیدپذیر جهت توسعه مفاهیم زیست‌پالایش برای تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و مواد شیمیایی با ارزش زیستی است. زیست‌توده تنها منبع تجدیدپذیر کربن است که می‌تواند با فرآیندهای مختلف شیمیایی-حرارتی و بیولوژیکی به محصولات جامد، مایع و گاز

تبدیل شود. بر اساس آمار سال ۲۰۱۰، اگرچه- زیست‌توده حدود ۱۴ درصد از مصرف انرژی جهان را تأمین می‌کند، هنوز مقادیر زیادی از آن وجود دارد که مورد استفاده صحیح قرار نمی‌گیرد و سوزانده و یا انباشته می‌شود که موجب آلودگی‌هایی مانند گرد و غبار و تولید گازهای اسیدی (اکسیدهای گوگرد و اکسیدهای نیتروژن) می‌گردد. بنابراین استفاده از این منابع ارزشمند، نه تنها می‌تواند موجب کاهش آلودگی‌های محیط زیستی گردد، بلکه پتانسیل اقتصادی بسیار مناسبی جهت تولید انرژی و مواد شیمیایی نیز می‌باشد. اتحادیه اروپا، استفاده از سوخت زیستی (زیست‌نفت) را به عنوان راهی برای کاهش وابستگی به نفت خام و انجام تفاهم‌نامه کیوتو^۱ توسعه داده است. امروزه ما شاهد افزایش چشم‌گیر فعالیت‌ها و بودجه دولت‌ها و شرکت‌ها در امر تحقیق، توسعه و عرضه سامانه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر هستیم. این فعالیت‌ها و صرف بودجه‌های کلان، در نهایت باعث کاهش قیمت تمام‌شده انرژی تجدیدپذیر و رقابت‌پذیری با سیستم سنتی موجود می‌گردد. سرمایه‌گذاری جهانی در بخش زیست‌پالایش تا ۱۷۰

1- Kyoto protocol

شیمیایی با ارزش نیازمند فناوری‌های مناسب در فرآیند پالایش زیستی است. پیچیدگی‌های مواد لیگنوسلولزی به‌عنوان ماده‌اولیه جهت سازگاری با روش‌های زیست‌پالایش، تطابق آن‌را با فناوری‌های پتروشیمی بسیار سخت و یا ناممکن کرده است. تبدیل مستقیم کل زیست‌توده منجر به تولید مخلوط پیچیده‌ای از ترکیبات متنوع می‌شود که جداسازی هر ماده را سخت و پرهزینه می‌کند. مثال‌های فناوری‌های جداسازی زیست‌توده، فعالیت متداول در صنایع خمیر و کاغذ (خمیرسازی کرافت، سولفیت، سودا، ارگانوسالو و غیره) می‌باشد. زیست‌توده در این فرآیندها شامل کربوهیدرات‌های باقی‌مانده و محصولات تجزیه‌شده از همی‌سلولز و بخشی هم از لیگنین و مواد غیرآلی از فرآیند خمیرسازی موجود در مایع پخت می‌باشد. در حال حاضر، کاربرد اصلی مایع پخت، تولید حرارت است. مثال دیگر تولید بیواتانول از تخمیر گلوکز توسط هیدرولیز آنزیمی سلولز و تولید فورفورال از آب‌زدائی همی‌سلولزهای مشتق شده از زایلوز است. به‌طور کلی، فناوری‌های جداسازی، پیچیده، وقت‌گیر و گران قیمت هستند. در اکثر موارد، بر روی جداسازی یک یا دو ترکیب زیست‌توده (مانند خمیر سلولزی و یا لیگنین از خمیر ارگانوسالو^۲) تمرکز شده است. اخیراً، پیرولیز سریع جهت تبدیل زیست‌توده به زیست‌نفت با بازده زیاد توسعه یافته است. پیرولیز سریع فناوری جذابی برای توسعه پالایش زیستی جهت تولید زیست‌سوخت و مواد شیمیایی با ارزش است (۲۵). این روش جداسازی ترکیبات اصلی زیست‌توده (سلولز، همی‌سلولز و لیگنین) جهت تولید محصول مایع است. این مایع شامل بسیاری از مواد با ارزش است که جداسازی و خالص‌سازی آن بسیار ارزشمند است.

میلیارد دلار پیش‌بینی شده است که افزایش ظرفیت، موجب توسعه تقاضای سوخت زیستی خواهد شد. سوخت زیستی بالغ بر ۲۵۰ میلیارد دلار سهم بازار سوخت را در دهه آینده به خود اختصاص خواهد داد (۱۸).

گرچه باگاس از مواد خام بالقوه برای صنعت کاغذ است، دارای یک مشکل جدی یعنی حضور مغز همراه بخش‌های فیبری می‌باشد. این مسأله از نظر کاغذسازی نامطلوب است و تأثیراتی منفی از جمله بازده کم‌تر خمیر، مصرف زیاد مواد شیمیایی، مسایل مربوط به کیفیت و مشکلات مربوط به قابلیت عبور ماشین کاغذ را دارد. بنابراین حذف مغز از بخش‌های فیبری باگاس همواره مورد توجه صنایع خمیر و کاغذ بوده است (۸). به‌لحاظ وزنی، مقدار مغز خالص در باگاس حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد متغیر است. سالانه بیش از یک میلیون تن از آن در صنایع ایران سوزانده می‌شود و زیرساختی برای استفاده از آن وجود ندارد. مغز عمدتاً از سلول‌های پاراننشیمی نرم دیواره‌نازک و با شکل‌های نامنظم تشکیل شده است که با مقدار زیادی از خاکستر و با قابلیت جذب بالا همراه می‌باشد. با وجود این‌که از لحاظ ساختار شیمیایی شبیه فیبر است، اما از لحاظ ویژگی‌های فیزیکی و مرفولوژیکی بسیار با آن متفاوت می‌باشد و نمی‌تواند به خمیر مناسب تبدیل شود. این موضوع به‌دلیل ابعاد کوچک، طبیعت فیزیکی غیر فیبری و تجمع نزدیک (پیوند) با گرد و غبار است. به‌خاطر همین معایب و مشکلات ذاتی مرتبط، لازم است تا حد ممکن مغز به‌طور مؤثر حذف شود؛ در غیر این صورت برای تولید خمیر با عدد کاپای مشابه، مواد شیمیایی بیشتری مصرف می‌شود (۹ و ۱۹).

تبدیل زیست‌توده به زیست‌سوخت^۱ و مواد

نیز هستند. خاکستر تأثیر زیادی بر روی بازده تولید زیست‌نفت دارد. بازده زیست‌نفت حاصل از مواد چوبی با میزان خاکستر کم، بیشتر از زیست‌توده‌های کشاورزی با مقدار خاکستر و فلزات قلیایی زیاد است. علاوه بر آن، حضور فلزات قلیایی در بعضی از موارد منجر به تشکیل فاز مجزای تولید زیست‌نفت در فرآیند پیرولیز سریع می‌شود که حاوی آب بیشتری است. آنالیز فیزیکی و شیمیایی باگاس کلمبیا نشان داده است که مقدار سلولز، همی‌سلولز و لیگنین آن به ترتیب ۴۳/۵، ۳۳ و ۲۱/۷ درصد است. بازده تولید زیست‌نفت حاصل از آن ۵۳ درصد بوده می‌باشد (۱۴). آنالیز عنصری زیست‌نفت باگاس نشان داده است که مقدار اکسیژن موجود در آن (۶۷/۱۹ درصد) بیشتر از پوست نارگیل (۴۳/۲ درصد) و کمتر از ساقه برنج (۴۹/۸ درصد) است (۱). تاکنون، مطالعه خاصی بر روی پیرولیز سریع زیست‌توده مغز باگاس صورت نگرفته است. با توجه به این‌که، نیشکر به‌طور وسیع در جنوب کشور کشت می‌شود و مغز باگاس از فراوان‌ترین ضایعات زیست‌توده لیگنوسلولزی حاصل از فرآیند مغززدایی در صنایع خمیر و کاغذ و MDF در ایران است، هدف این تحقیق مقایسه امکان استفاده از باگاس و مغز آن جهت تولید زیست‌نفت در راکتور نیمه‌صنعتی بستر سیال و توسعه کاربردی پالایش زیستی جهت تولید زیست‌سوخت و مواد با ارزش افزوده زیاد است.

همی‌سلولز، سلولز و لیگنین به روش‌های مختلفی در دماهای متفاوت واکنش می‌دهند. در فرآیندهای شیمیایی - حرارتی، نوع و بازده محصول تولیدی تحت تأثیر شرایط فرآیند حرارتی است. به‌خاطر شرایط نسبتاً ملایم پیرولیز، جداسازی هر محصول از پیچیدگی و واکنش نامطلوب کمتر و پایداری بیشتری برخوردار است. سپس زیست‌نفت در یک فاز از فرآیند پیرولیز سریع تولید می‌شود که تمامی ترکیبات زیست‌توده به‌طور هم‌زمان و در یک دما تجزیه می‌شوند. معمولاً برای تعیین مقدار درصد ترکیبات شیمیایی مواد لیگنوسلولزی مناسب جهت تولید زیست‌نفت، از آنالیز تقریبی (به‌منظور تعیین میزان مواد فرار، کربن ثابت و خاکستر) و آنالیز نهایی (به‌منظور تعیین مقدار کربن، هیدروژن، نیتروژن، سولفور و اکسیژن) استفاده می‌شود. جدول ۱ نشان می‌دهد که در مقایسه با گونه‌های چوبی (مانند کاج، صنوبر، اکالیتوس)، گونه‌های غیر چوبی (مانند علف‌ها، باگاس و ساقه گندم) دارای خاکستر بیشتری می‌باشند. اگرچه ترکیبات خاکستر در بین گونه‌ها متفاوت است، ولی به‌طور کلی خاکستر گیاهان غیر چوبی حاوی فلزات سنگین قلیایی (نظیر سیلیکون و در بعضی موارد آهن و آلومینیم) بیشتری است. گونه‌هایی که مقدار فلزات سنگین قلیایی بیشتری دارند معمولاً دارای میزان پتاسیم و کلسیم بیشتر و مقدار سدیم و منیزیم کمتری نسبت به دیگر گونه‌ها

Table 1. Proximate and ultimate analysis of some lignocellulosic materials.

منبع Ref	آنالیز نهایی Ultimate analysis					آنالیز تقریبی Proximate analysis			زیست توده
	اکسیژن %O	سولفور %S	نیتروژن %N	هیدروژن %H	کربن %C	کربن ثابت Fixed carbon	مواد فرار volatiles	خاکستر Ash	
22 و 2	47	-	0.1	6.3	50.3	19.5	80.3	0.2-0.5	کاج (Pine)
6	45.2	-	0.1	6.3	48.4	17.6	81.9	0.5	اکالیپتوس (Eucalyptus)
10	40.7	-	0.6	6.1	50.6	-	-	-	هیبرید صنوبر (poplar hybrid)
24, 3 4	42.6	0.2	0.8	5	42.5	10.9	84	5.1	ذرت (Corn)
16	39.6	0.01	0.4	5.4	44.8	15	-	11.3	باگاس (Bagasse)
11, 3	35.5	-	0.7	5.5	41.8	21.4	66.3	13.7	ساقه گندم (Wheat straw)
21, 3	37.4	0.19	0.8	5.9	46.7	14.4	76.7	8.9	علف (Grass)
5	32	-	0.5	6	51.4	-	76.7	2.1-3.8	ضایعات جنگلی (Forest wastes)

مواد و روش‌ها

تعیین مشخصات زیست توده برای تولید زیست‌نفت^۱: باگاس (مغززدایی نشده) و مغز آن از هفت تپه خوزستان فراهم شد. این ماده به مدت دو روز هوا خشک گردید و سپس به مدت ۲ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده تا رطوبت آن به زیر ۱۰ درصد وزن خشک برسد. برای انجام آزمایشات شناسایی ترکیبات شیمیایی و فیزیکی، ماده اولیه به اندازه ذرات کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر آسیاب و الک شد. ترکیبات شیمیایی مواد اولیه بر اساس استانداردهای ذکر شده در جدول ۲ تعیین گردید.

مقدار رطوبت نمونه بر اساس روش ASTM D3173 و مقدار خاکستر بر اساس روش ASTM

D3172 اندازه‌گیری شد. میزان مواد فرار (گازها و بخارات ناشی از نمونه زیست‌توده در طی فرآیند حرارتی) نیز بر اساس روش ASTM D3174 تعیین گردید. میزان کربن ثابت با کم کردن درصد مقدار رطوبت، مقدار درصد مواد فرار و مقدار درصد خاکستر از ۱۰۰ به دست آمد. مقدار حاصل، میزان کربن ثابت حاضر در نمونه بر حسب درصد است. ترکیبات باگاس با آنالیز تقریبی (رطوبت، مواد فرار، کربن ثابت و خاکستر) و آنالیز نهایی (کربن، هیدروژن، نیتروژن و سولفور) اندازه‌گیری شد. این روش‌ها، اکسیداسیون کامل و آنی یا احتراق سریع نمونه است. درصد ترکیب اکسیژن با کم کردن جمع کربن، هیدروژن، نیتروژن و گوگرد از ۱۰۰ به دست آمد. جهت شناسایی ترکیبات عنصری باگاس از دستگاه آنالیز عنصری با آنالیز کننده CHNS (EXETER CE 490) طبق استاندارد

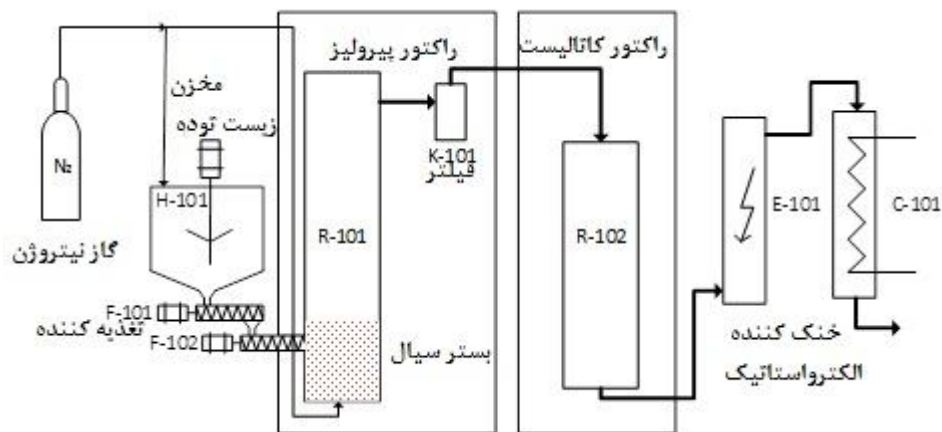
1- Bio-oil

ASTM D5373 استفاده شد (جدول ۲).

آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA): وزن‌سنجی حرارتی، اتلاف وزن در دما و زمان معین را ارزیابی می‌کند که به‌عنوان مطالعه پایه‌ای برای فرآیند فعال‌سازی است (۳). این فرآیند کمک می‌کند تا محدوده دمای پیرولیز تعیین شود. در این تحقیق از آنالیزکننده A Perkin Elmer Pyris برای انجام آنالیز وزن‌سنجی حرارتی استفاده شد. نمونه‌ها با گاز نیتروژن با نرخ جریان ۱۰ میلی‌لیتر در دقیقه طبق برنامه ذیل تحت حرارت قرار گرفته‌اند: نرخ حرارت‌دهی ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از ۳۲ تا ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد (ایزوترمال ۱۰۵ درجه‌سانتی‌گراد برای ۵ دقیقه)، نرخ حرارت‌دهی ۲۵ سانتی‌گراد بر دقیقه از ۱۰۵ تا ۹۰۵ درجه سانتی‌گراد (ایزوترمال ۹۰۵ درجه‌سانتی‌گراد برای ۱۵ دقیقه)، خنک‌کننده ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از ۹۰۵ تا ۲۰۰ درجه‌سانتی‌گراد. پیش‌تیمار آب گرم: جهت حذف مواد غیر آلی موجود در باگاس و مغز آن، پیش‌تیمار آب گرم انجام شد. باگاس با آب با نسبت تقریبی ۲۰ به ۱ در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت نیم ساعت تیمار شد. سپس نمونه‌ها با آب سرد شست‌شده شدند. پس از آن، در آن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۵ ساعت خشک شدند تا رطوبت آن‌ها به زیر ۱۰ درصد کاهش یافت.

دستگاه پیرولیز سریع بستر سیال: آزمایشات پیرولیز سریع در راکتور بستر سیال پیوسته در مقیاس

نیمه‌صنعتی در آزمایشگاه گروه مهندسی شیمی دانشگاه خرونینگن هلند انجام شد (شکل ۱). دستگاه شامل سیستم تغذیه‌کننده پیوسته، راکتوربستر سیال، سیکلون، مخزن جمع‌آوری ذغال، سیستم جمع‌آوری زیست‌نفت و سنجنده جریان گاز است. سیستم تغذیه زیست‌توده شامل یک مخزن بسته، هم‌زن، تغذیه‌کننده ماریچی با قابلیت تنظیم سرعت و جریان نیتروژن است. راکتور بستر سیال از فولاد ضد زنگ ساخته شده و متشکل از لوله‌های استوانه‌ای به ابعاد ۳۰۰×۲۰۰×۶۰۰ است که به‌طور غیرمستقیم به‌وسیله حرارت‌دهنده الکتریکی گرم می‌شود. شن سیلیکا با اندازه ۴۰۰-۶۳۰ میکرومتر به‌عنوان مواد بستر استفاده شد. نیتروژن هم به‌عنوان گاز سیال‌کننده با نرخ ۲ L/min استفاده گردید که با حرارت‌دهنده الکتریکی در دمای پیرولیز ۴۷۰ درجه‌سانتی‌گراد گرم شد. گازهای خروجی پیرولیز به کروماتوگرافی گازی-جرمی و جریان‌سنج جهت شناسایی نوع گاز و سرعت جریان آن‌ها، متصل گردید. موازنه جرمی با توزین همه ورودی‌ها و خروجی‌ها به‌درون سیستم پیرولیز انجام شد. همه اجزای سیستم آزمایش مانند راکتور مخزن ذغال، رسوب‌دهنده الکتریکی به‌طور مجزا قبل و بعد از هرآزمایش توزین شد تا مقدار ذغال و نفت زیستی تعیین شود. کارایی گاز، مایع و ذغال با نسبت بین مواد جمع‌آوری‌شده و زیست‌توده مصرف‌شده در فرآیند پیرولیز محاسبه گردید (۴).



شکل ۱- تصویر سیستم پیرولیز سریع بستر سیال.

Figure 1. Overview of fluidized bed fast pyrolysis system.

که نشان می‌دهد مغز باگاس می‌تواند ماده مناسبی جهت تولید زیست‌نفت باشد. مقدار مواد استخراجی و فلزات سنگین مغز باگاس بیشتر از باگاس و بسیاری از مواد لیگنوسلولزی چوبی است. فلزات سنگین موجود در زیست‌توده در فرآیند پیرولیز موجب تجزیه ناخواسته مواد شیمیایی در زیست‌توده و تبدیل آن‌ها به ذغال و گاز می‌شوند. علاوه بر آن، این فلزات موجب افزایش تولید مقدار آب در زیست‌نفت می‌شوند (۱۴). در واقع، اگر این فلزات قبل از پیرولیز حذف شوند موجب افزایش بازده زیست‌نفت می‌گردند.

نتایج و بحث

ترکیبات فیزیکی - شیمیایی باگاس: آنالیز باگاس و مغز آن (جدول ۲) نشان می‌دهد که مغز باگاس در مقایسه با باگاس، حاوی لیگنین و مواد استخراجی بیشتر و سلولز و همی‌سلولز کمتر است. این امر نشان می‌دهد که در فرآیند پیرولیز سریع احتمالاً مقدار کربن فعال بیشتری از مغز باگاس در مقایسه با باگاس تولید خواهد شد. مقدار اکسیژن مغز باگاس بیشتر از باگاس است که این نشان‌دهنده وجود ترکیبات اکسیژن‌دار بیشتر در زیست‌نفت حاصل می‌باشد. درصد مواد فرار مغز باگاس مشابه بسیاری از مواد لیگنوسلولزی مورد استفاده در تولید زیست‌نفت است

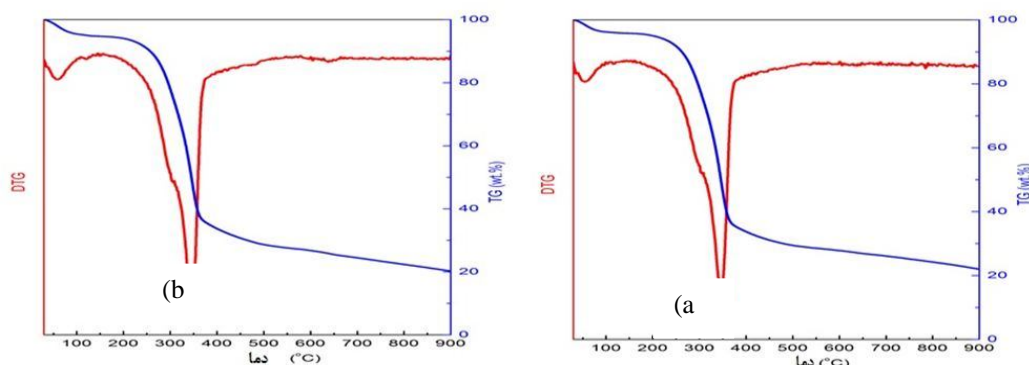
جدول ۲- ترکیبات فیزیکی - شیمیایی باگاس.

Table 2. Physical and chemical components of bagasse.

روش استاندارد Standard	درصد وزنی % (w/w)		ترکیبات Components
مغز باگاس Bagasse pith	باگاس (مغززدایی نشده) Bagasse		
Kurshchner-Huffer	45.5	50.5	سلولز (Cellulose)
Wise et al (۲۳)	24.5	24.5	همی سلولز (Hemicellulose)
TAPPI T222 om-88	25.5	23.5	لیگنین (Lignin)
TAPPI T2 04 om-88	4.5	1.5	مواد استخراجی (Extractive)
آنالیز تقریبی (درصد) Proximate Analysis (%)			
ASTM D 3173	10	9	رطوبت (Moisture)
ASTM D 3174	72	75	مواد فرار (Volatile)
ASTM D 3175	13	13.5	کربن ثابت (Fixed carbon)
ASTM D 3172	5	2.5	خاکستر (Ash)
آنالیز نهایی (درصد) Ultimate analysis (%)			
ASTM D 4239	39.15	41.9	کربن (C)
ASTM D 4239	5.35	5.5	هیدروژن (H)
ASTM D 4239	0.36	0.29	نیتروژن (N)
ASTM D 4239	0.01	0.01	سولفور (S)
By difference	55.14	52.2	اکسیژن (O)
فلزات سنگین (ppm) Heavy metals (ppm)			
ASTM D 5373	19110	11120	کلسیم (Ca)
ASTM D 5373	3752	1268	آهن (Fe)
ASTM D 5373	3513	1772	منیزیم (Mg)
ASTM D 5373	581	600	سدیم (Na)
ASTM D 5373	532	344	فسفات (P)
ASTM D 5373	3596	1377	آلومینیم (Al)
ASTM D 5373	3136	2400	پتاسیم (K)
ASTM D 5373	86	29	تیتانیم (Ti)
ASTM D 5373	26	20	روی (Zn)

اتفاق می‌افتد، مربوط به تجزیه همی سلولز است. مقدار باقی‌مانده مواد حاصل از آنالیز وزن‌سنجی حرارتی حدود ۲۰ درصد وزن خشک ماده اولیه است که عمدتاً شامل ذغال و ترکیبات غیرآلی در خاکستر است. Pereira و همکاران (۲۰۱۱) گزارش داده‌اند که تخریب حرارتی باگاس از دمای حدود ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود و دو پیک حرارتی تقریباً در دمای ۳۱۰ و ۳۸۵ درجه سانتی‌گراد وجود دارد (۱۷). نتایج آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA) بیان می‌کند که ترکیبات باگاس و مغز آن در دمای کمتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تبخیر می‌شود و دمای پیرولیز این دو ماده تقریباً مشابه یکدیگر است.

آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA): آنالیز وزن‌سنجی حرارتی باگاس و مغز آن در شکل ۲ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، آنالیز وزن‌سنجی حرارتی این دو ماده مشابه یکدیگر است. کاهش اولیه وزن از تبخیر آب جذب شده در دمای حدود ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در دو نمونه شروع شد که نتیجه‌اش برای باگاس و مغز آن به ترتیب ۸/۵ و ۶/۷ درصد کاهش وزن اولیه می‌باشد. بیشترین اتلاف وزنی باگاس و مغز آن در دمای بین ۲۵۰ و ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد که با تجزیه حرارتی ترکیبات اصلی آن‌ها (سلولز، همی سلولز و لیگنین) مرتبط است. انحنای نمودار وزن‌سنجی تفاضلی (DTG) در نمودار (a) که در دمای حدود ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد



شکل ۲- آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA) و وزن‌سنجی تفاضلی (DTG) (a) باگاس، (b) مغز باگاس.

Figure 2. TGA and DTG analysis, a) Bagasse, b) Bagasse pith.

و اکسیژن کمتری است. این عامل نه تنها موجب افزایش ارزش حرارتی آن نسبت به دیگر مواد لیگنوسلولزی می‌شود، بلکه هزینه تولید سوخت زیستی آن را نیز کاهش می‌دهد. ارزش حرارتی زیست‌نفت حاصل از باگاس حدود ۲۰/۶ مگاژول بر کیلوگرم به‌دست آمده که این مقدار بیشتر از ارزش حرارتی کاج (۲)، ساقه ذرت (۳ و ۴)، ساقه گندم (۳ و ۱۱)، علف‌ها (۳ و ۲۱) و ساقه برنج (۱۲) است. اکسیژن کمتر موجود در باگاس، هزینه فرآیند تقویت زیست‌نفت جهت تبدیل به بیودیزل و دیگر مواد شیمیایی را کاهش می‌دهد.

زیست‌نفت حاصل از پیرولیز سریع در راکتور بستر سیال نیمه صنعتی: جدول ۳ آنالیز زیست‌نفت حاصل از پیرولیز سریع باگاس و مغز آن در راکتور بستر سیال را نشان می‌دهد. زیست‌نفت حاصل، از چگالنده الکترواستاتیکی جمع‌آوری شده است. مغز باگاس دارای مقدار کربن ۳۷/۹۷ درصد و اکسیژن ۵۴ درصد است که در مقایسه با باگاس، مقدار کربن کمتر و اکسیژن بیشتری دارد. به عبارت دیگر، باگاس نسبت به مغز آن و نیز دیگر مواد لیگنوسلولزی مانند چوب اکالیپتوس و بقایای ذرت (۴ و ۷) حاوی کربن بیشتر

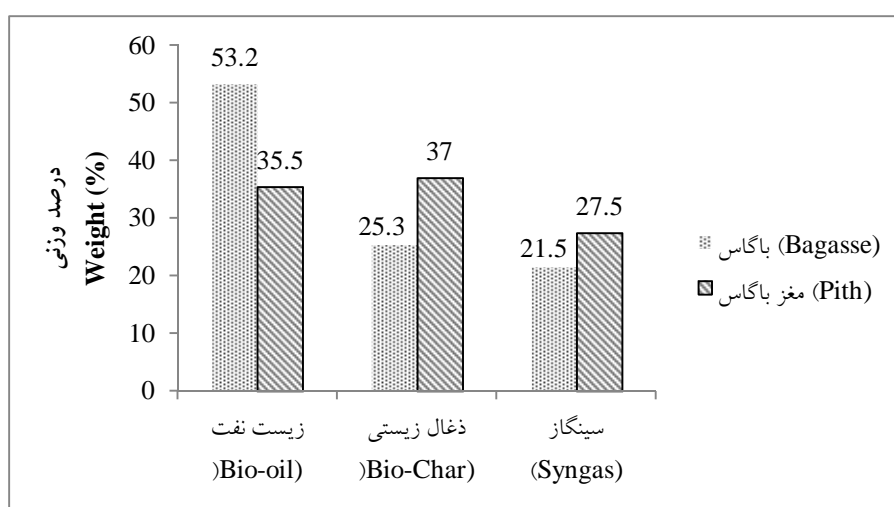
جدول ۳- زیست‌نفت حاصل از پیرولیز سریع باگاس و مغز آن در راکتور بستر سیال.

Table 3. Bio-oil from fast pyrolysis of bagasse and its pith in fluidized bed reactor.

مغز باگاس Bagasse pith	باگاس (مغزدایی نشده) Bagasse	ویژگی‌های زیست‌نفت Characteristics of bio-oil
37.97	51.7	کربن (C%)
7.84	6.64	هیدروژن (H%)
0.17	0.14	نیتروژن (N%)
0.01	0.01	سولفور (S%)
54.01	41.51	اکسیژن (O%)
15.6	20.6	ارزش حرارتی (HHV, mj/kg)

نیز با هم کمی متفاوت است. در بعضی از دستگاه‌های پیرولیز از کندانسور لوله‌ای و تله‌های سرمایشی استفاده می‌شود تا ترکیبات پایین و بالای نقطه شبنم را بگیرد. در این واحدها از یخ و آب برای خنک‌کردن بخارات پیرولیزی استفاده می‌شود. همچنین برای حذف بخارات پیرولیز که شامل آب و ترکیبات فرار سبک مانند فرم‌آلدئید و برخی کتون‌ها با نقطه جوش پایین است، از تله شیشه‌ای مستقر در فلاسکی حاوی مخلوط اتانول و نیتروژن مایع با دمای ۴۰- درجه سانتی‌گراد برای سرد کردن گازهای پیرولیز استفاده می‌شود. استفاده از این سیستم‌ها می‌تواند بازده تولید زیست‌نفت را در حدود ۵-۱۵ درصد افزایش دهد (۴).

موازنه جرمی محصولات حاصل از پیرولیز سریع باگاس و مغز آن نشان می‌دهد که بازده زیست‌نفت حاصل از آن‌ها به ترتیب حدود ۵۳ و ۳۴ درصد است (شکل ۳). بازده زیست‌نفت حاصل از باگاس نسبتاً مشابه تحقیق Montoya و همکاران (۲۰۱۵) است (۱۴). Asadollah و همکاران (۲۰۰۷) در تحقیقات خود، بازده زیست‌نفت حاصل از پیرولیز سریع باگاس را حدود ۶۶ درصد گزارش داده‌اند (۱). دلیل تفاوت مقدار بازده به دست آمده در این تحقیق با نتایج ایشان را می‌توان ساختار و ترکیبات متفاوت باگاس ایران نسبت به باگاس مورد استفاده آن‌ها دانست. البته در تحقیق‌های مختلف سیستم‌های جمع‌آوری زیست‌نفت



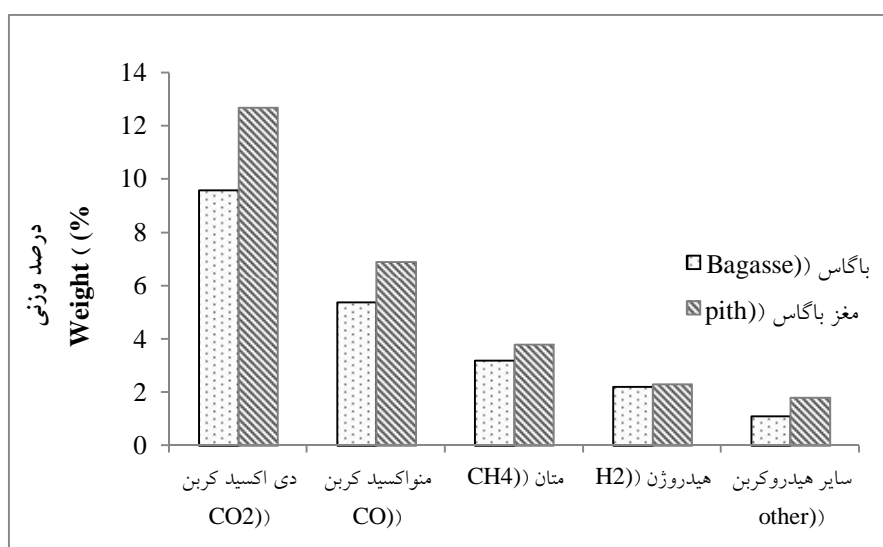
شکل ۳- درصد وزنی محصولات حاصل از پیرولیز سریع باگاس (مغزدایی نشده) و مغز باگاس.

Figure 3. Weight percent of fast pyrolysis products from bagasse and its pith.

سایر هیدروکربن‌ها مانند اتان، پروپان و اتیلن تشکیل شده است. شکل ۴ درصد وزنی گازهای مختلف تولید شده حاصل از پیرولیز سریع آن‌ها را نشان می‌دهد. گاز دی‌اکسید کربن، گاز غالب در بین گازهای دیگر است. باگاس مقدار دی‌اکسید کربن بیشتری نسبت به مغز باگاس در طی فرآیند پیرولیز سریع تولید می‌کند. حیدری و همکاران (۲۰۱۴) گزارش داده‌اند که تغییر دما و سرعت تغذیه، میزان تولید گازهای پیرولیز را تغییر می‌دهد (۷). غلظت دی‌اکسید کربن با افزایش دما از ۴۵۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت تغذیه از ۹۰ به ۱۱۰ گرم بر ساعت کاهش یافته است. منبع تولید دی‌اکسید کربن، تجزیه سلولز و همی سلولز حاصل از پیرولیز گروه‌های کربوکسیل است.

ذغال زیستی به‌دست آمده از پیرولیز سریع مواد لیگنوسلولزی کاربردهای زیادی دارد. از آن می‌توان به‌عنوان سوخت (به تنهایی یا مخلوط با سایر سوخت‌ها)، به‌عنوان جاذب ارزان برای برخی از آلاینده‌ها مانند فنول، رنگ، آرسنیک، کادمیم، سرب و کروم استفاده کرد (۱۵). به‌علاوه ذغال می‌تواند به خاک اضافه شود تا کربن، نیتروژن و سایر موادی که برای رشد گیاه مهم است را تأمین کند و کیفیت خاک را بهبود دهد (۱۳). به‌نظر می‌رسد که اندازه ذرات کوچک‌تر و خاکستر بیشتر مغز باگاس نسبت به باگاس، موجب تولید کربن فعال بیشتری می‌شود. به این موضوع در تحقیقات حیدری و همکاران (۲۰۱۴) نیز اشاره شده است (۷).

ترکیبات گازی پیرولیز سریع باگاس و مغز آن از گاز دی‌اکسید کربن، منواکسید کربن، متان، هیدروژن و



شکل ۴- درصد وزنی ترکیبات گازی حاصل از پیرولیز سریع باگاس.

Figure 4. Weight percent of gas components from fast pyrolysis of bagasse.

باگاس و مغز آن در راکتور بستر سیال نیمه‌صنعتی انجام گرفت. پیرولیز سریع باگاس در دمای ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد، جریان گاز نیتروژن ۲ لیتر در دقیقه و نرخ تغذیه ۹۰ گرم در ساعت به‌صورت پیوسته

نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق توسعه کاربردی مفهوم زیست‌پالایش در صنایع خمیر و کاغذ است. در این راستا تولید زیست‌نفت حاصل از فرآیند پیرولیز سریع

آنالیز گازی نشان داد که ترکیبات گازی پیرولیز سریع باگاس، گاز دی‌اکسید کربن، منواکسید کربن، متان، هیدروژن و سایر هیدروکربن‌ها مانند اتان، پروپان است و دی‌اکسید کربن، گاز غالب در بین گازهای دیگر است. زیست‌نفت حاصل از پیرولیز سریع باگاس نه تنها امکان تولید انرژی تجدیدپذیر و تولید ماده شیمیایی مختلف را نشان داده است، بلکه گازهای حاصل از آن (سینگاز) به‌عنوان یک منبع مناسب تأمین انرژی در صنایع قابل استفاده است.

انجام شد. نتایج نشان داد که باگاس پتانسیل بسیار خوبی جهت تبدیل به زیست‌نفت را دارد. بازده تولید زیست‌نفت از باگاس در یک فاز، ۵۳ درصد بوده است. آنالیز زیست‌نفت‌های به‌دست آمده نشان داده است که باگاس مقدار کربن بیشتر و اکسیژن کمتری نسبت به مغز آن دارد. مغز باگاس حاوی لیگنین بیشتری نسبت به باگاس است که این موجب پایداری حرارتی بیشتر و در نتیجه تولید ذغال زیستی بیشتر آن نسبت به باگاس طی فرآیند پیرولیز سریع می‌شود.

منابع

1. Asadullah, M., Rahman, M.A., Ali, M.M., Rahman, M.S., Motin, M.A., Sultan, M.B., and Alam, M.R. 2007. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel.*, 86: 16. 2514-2520.
2. Bertero, M., De la Puente, G., and Sedran, U. 2012. Fuels from bio-oils: Bio-oil production from different residual sources, characterization and thermal conditioning. *Fuel.* 95: 1. 263-281.
3. Demirbas, A. 2004. Combustion Characteristics of different biomass fuels. *Prog. Energy Combust. Sci.* 30: 2. 219-230.
4. Ebrahimi-Nik, M.A., Heidari, A., and Younesi, H. 2014. Bio-oil production from fast pyrolysis of Corn residues and Eucalyptus wood in fluidized bed reactor. *Journal of Agricultural Machinery.* 4: 2. 226-235.
5. Fahmi, R., Bridgwater, A.V., Donnison, I., Yates, N., and Jones, J.M. 2008. The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability. *Fuel.* 87: 7. 1230-1240.
6. Garcia-Perez, M., Wang, S., Shen, J., Rhodes, M., Lee, W.J., and Li, C.Z. 2008. Effects of Temperature on the Formation of Lignin-Derived Oligomers during the Fast Pyrolysis of Mallee Woody Biomass. *Energy Fuels.* 22: 3. 2022-2032.
7. Heidari, A., Stahl, R., Younesi, H., Rashidi, A., Troeger, N., and Ghoreyshi, A.S. 2014. Effect of process conditions on product yield and composition of fast pyrolysis of *Eucalyptus grandis* in fluidized bed reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* 20: 4. 2594-2602.
8. Jain, R.K. 2001. Upgradation of quality of bagasse through advance de-pithing process. Report of central pulp and paper research institute Saharanpur, 72p.
9. Jain, R.K., Dixit, A., Singh, K., Mathur, R.M., and Kulkarni, A.G. 2005. An Improved, Environmentally Benign Process for Manufacturing of High Quality Chemical Bagasse Pulp. Tappi Engineering, pulping and environmental conference, Philadelphia, USA.
10. Jones, S.B., Holladay, J.E., Valkenburg, C., Stevens, D.J., Walton, C., Kinchin, C., Elliott, D.C., and Czernik, S. 2009. Production of gasoline and diesel from biomass via fast pyrolysis, hydrotreating and hydrocracking: a design case. U.S. Department of Energy, 76p.
11. Jung, K.A., Woo, S.H., Lim, S.R., and Park, J.M. 2015. Pyrolytic production of phenolic compounds from the lignin residues of bioethanol processes. *Chemical Engineering Journal.* 259: 1. 107-116.
12. Menon, V., and Rao, M. 2012. Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals and Biorefinery concept. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 38: 4. 522-550.
13. Mohan, D., Rajput, S., Singh, V.K., Steele, P.H., and Pittman, C.U. 2011. Modeling and

- evaluation of chromium remediation from water using low cost bio-char, a green adsorbent. *Journal of Hazardous Materials*. 188: 1-3. 319-333.
14. Montoya, J.I., Valdés, C., Chejne, F., Gómez, C.A., Blanco, A., Marrugo, G., Osorio, J., Castell, E., Aristóbulo, J., and Acero, J. 2015. Bio-oil production from Colombian bagasse by fast pyrolysis in a fluidized bed: An experimental study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 112: 2. 379-387.
 15. Mullen, C.A., Boateng, A.A., Goldberg, N.M., Lima, I.M., Laird, D.A., and Hicks, K.B. 2010. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*. 34: 1. 67-74.
 16. Oasmaa, A., and Peacocke, C. 2010. Properties and Fuel use of biomass derived fast pyrolysis liquids. A guide; VTT Publications: Espoo, Finland, Publ. no. 731.
 17. Pereira, P.H.F., Voordward, H.C.J., Cioffi, M.O.H., Mulinari, D.R., Luz, S.M.D., and Da Silva, M.L.C. 2011. Sugarcane bagasse pulping and bleaching: thermal and chemical characterization. *BioResource*., 6: 3. 2471-2482.
 18. Qureshi, N., Hodge, and D., and Vertes, A. 2014. *Biorefineries: Integrated Biochemical Processes for Liquid Biofuels*. Elsevier, 296p.
 19. Rasooly Garmaroody, E., Rashidavi, J., Ramezani, O., and Saracean, A.R. 2016. Effect of Depithing on Bagasse pulp and paper properties. *J. of Wood and Forest Science and Technology*. 22: 4. 167-185.
 20. Rodrigues, J.A.R. 2011. From the Mill to a Biorefinery: The Sugar Factory as an Industrial Enterprise for the Generation of Biochemicals and Biofuels. *Química Nova*. 34: 7. 1242-1254.
 21. Uzun, B.B., Apaydin-Varol, E., Ateş, F., Özbay, N., and Pütün, A.E. 2010. Synthetic fuel production from tea waste: Characterisation of bio-oil and bio-char. *Fuel*. 89: 1. 176-184.
 22. Westerhof, R.J., Brilman, D.W.F., Van Swaaij, W.P.M., Kersten, S.R.A. 2010. Effect of Temperature in Fluidized Bed Pyrolysis of Biomass: Oil Quality Assessment in Test Units. *Ind. Eng. Chem. Res.* 49: 3. 1160–1168.
 23. Wise, L.E., Murphy, M., and Adieco, D.A. 1946. Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses. *Paper Trade Journal* 122: 1. 35–43.
 24. Zhang, H., Xiao, R., Wang, D., He, G., Shao, S., Zhang, J., and Zhong, Z. 2011. Biomass fast pyrolysis in a fluidized bed reactor under N₂, CO₂, CO, CH₄ and H₂ atmospheres. *Bioresource Technology*., 102: 5. 4258-4264.
 25. Zheng, A., Chen, T., Sun, J., Jiang, L., Zhao, Z., Huang, Z., Zhao, K., Wei, G., He, F., and Li, H. 2017. Toward Fast Pyrolysis-Based Biorefinery: Selective Production of Platform Chemicals from Biomass by Organosolv Fractionation Coupled with Fast Pyrolysis. *ACS Sustainable Chem. Eng.* DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b00622.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Wood & Forest Science and Technology, Vol. 24 (4), 2017
<http://jwfst.gau.ac.ir>

Biorefinery of Bagasse and Its Pith by Fast Pyrolysis in Fluidized Bed Reactor

P. Ghorbannezhad¹, *M.R. Dehghani Firouzabadi², A. Ghasemian²,
P. De Wild³ and H.J. Heeres⁴

¹Ph.D. Student, Dept., of Pulp and Paper Technology, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, ²Associate Prof., of Pulp and Paper Technology, Faculty of Wood and Paper Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, ³Energy Research Centre of the Netherlands (ECN), Petten, the Netherlands, ⁴Professor, Dept., of Chemical Engineering, Engineering and Technology Institute Groningen, University of Groningen, Groningen, the Netherlands

Received: 08/15/2017; Accepted: 10/15/2017

Abstract

Background and objectives: Biomass is the only source of renewable carbon which can be converted to biofuels and added value products. Thermochemical processes such as fast pyrolysis can play an important role for production of biofuels, bio-chemicals and syngases from biorefinery technologies. With regards to this point that sugarcane is widely cultivated in south of Iran and its pith is an abundant resource of biomass from de-pithing process in pulp and paper and medium density fiberboard industries. The aim of this study is the comparison possibility use of bagasse and its pith for bio-oil production in pilot scale fluidized bed reactor and application development of biorefinery for bio-oil production and added-value products.

Material and methods: This research conducted on biofuel production in a pilot-scale reactor operating in a fluidized bed from bagasse and its pith. The components of bagasse were measured by proximate and ultimate analysis. The type and amount of heavy metals were determined by applying an elemental analyzer. The thermal degradation characteristics were measured via TGA. Fast pyrolysis were performed at temperature of 470 °C, under screw feeder carrier the biomass in 90 g/h, inside pyrolyzer with nitrogen gas flow rate of 2 L/min.

Results: The elemental analysis indicated that the pith of bagasse contains substantial amounts of extractives and inorganic matter (predominantly Ca, K and Mg). The results of TGA indicated that most of weight losses of bagasse and its pith are among 250 and 350 °C which associated with main degradation components (cellulose, hemicellulose and lignin). Under the mentioned conditions, the yields of 53.2%, 35.5% (w/w); 25, 37% (w/w); 21%, 27.5% (w/w) for bio-oil, bio-char, and syngases were obtained from bagasse and pith respectively. The fixed carbon on bagasse was higher than its pith which led to higher energy value, while pith of bagasse contributes the higher bio-char. The heating value of bio-oil from bagasse is 20.6 MJ/kg which higher than pith and most of lignocellulosic materials reported in literatures. The lower oxygen content of bagasse will reduce the cost of upgrading for converting to bio-diesel and other chemicals. The pyrolysis gases components are CO₂, CO, CH₄, H₂ and other hydrocarbons like ethane, propane and ethylene. The carbon dioxide is the dominant gas among them. Bagasse produced more carbon dioxide than pith in fast pyrolysis process.

Conclusions: The pith showed higher thermal stability which result in more bio-char production, because of the higher lignin content of pith in the fast pyrolysis process. The fast pyrolysis bio-oil of bagasse not only showed the possibility renewable energy and chemicals, but also its syngases is usable as proper energy resource in industries.

Keywords: Bagasse pith, Biorefinery, Bio-fuel, Fast Pyrolysis

*Corresponding author: m_r_dehghani@mail.ru